

Расчет и измерение эффекта обратной бомбардировки катода в технологическом линейном ускорителе электронов со стоячей волной

В. В. Ханкин,^{1,2,а} В. И. Шведун^{1,2,б}

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

² ООО «Лаборатория электронных ускорителей МГУ».

Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 77.

Поступила в редакцию 07.08.2019, после доработки 29.10.2019, принята к публикации 31.10.2019.

На примере технологического ускорителя электронов со стоячей волной с максимальной энергией 10 МэВ изучен эффект обратной бомбардировки. Проведены расчеты динамики пучка, получены спектры обратных электронов, дана оценка мощности, выделяемой обратными электронами на катоде. Наблюдаемые эффекты хорошо согласуются с расчетами.

Ключевые слова: линейный ускоритель электронов, динамика пучка.

УДК: 539.1, 621.384.6. PACS: 29.20.Ej.

ВВЕДЕНИЕ

Бомбардировка катода электронами, не захваченными в режим ускорения и движущимися в обратном направлении (обратная бомбардировка), является известной проблемой при работе ускоряющих структур в режиме стоячей волны. Энергетический спектр и величина импульсного тока электронов обратной бомбардировки определяются распределением ускоряющего поля и конструкцией начальной части ускоряющей структуры, параметрами и устройством электронной пушки. Обратная бомбардировка при значительной средней мощности, сообщаемой электронами катоду, может приводить к нестабильности тока эмиссии и преждевременному выходу катода из строя. Однако даже при малой мощности при определенных условиях электроны обратной бомбардировки могут приводить к накоплению заряда на внутренних керамических элементах пушки, обуславливая периодические разрядные явления и сбои в работе ускорителя.

Проблема обратной бомбардировки катода в наибольшей мере изучалась для СВЧ-пушек с термоэмиссионным катодом, расположенным непосредственно в высокочастотном ускоряющем поле [1]. К настоящему времени опубликовано значительное число работ по данному направлению исследований.

Результаты исследований и способы снижения интенсивности потока обратных электронов в линейном ускорителе со стоячей волной опубликованы в относительно небольшом числе работ. Так, в работе [2] описан способ снижения интенсивности потока за счет уменьшения диаметра и изменения формы пролетного канала и напряженности ускоряющего поля ускоряющих резонаторов начальной части структуры. В работе [3] выполнено численное моделирование зависимости эффекта от напряженности поля и длины первого ускоряющего резонатора и от энергии инжекции.

Для линейного ускорителя, работающего с высоким значением коэффициента заполнения рабочего цикла, для снижения влияния обратного потока

электронов на работу ускорителя вводится регулировка тока накала катода в зависимости от его температуры [4], а для полного исключения влияния инжекция пучка от пушки осуществляется через поворотный магнит, при этом обратный поток поглощается коллектором [5].

Очевидным методом уменьшения потока обратных электронов является увеличение коэффициента захвата электронов пушки в режим ускорения и увеличение в целом числа электронов, движущихся к выходу ускоряющей структуры. В настоящей работе приведены результаты изучения эффекта обратной бомбардировки на примере технологического линейного ускорителя со стоячей волной с максимальной энергией и мощностью ускоренного пучка 10 МэВ и 15 кВт, с коэффициентом захвата более 60% [6–8].

1. РАСЧЕТ ЭФФЕКТА ОБРАТНОЙ БОМБАРДИРОВКИ

Ускоряющая структура технологического ускорителя, с помощью которого проводилось изучение эффекта обратной бомбардировки, состоит из 24 ускоряющих ячеек и 23 внутренних ячеек связи и работает в режиме стоячей волны. Распределение ускоряющего поля на оси структуры, использованной в эксперименте, показано на рис. 1. Первая ускоряющая ячейка имеет низкий уровень поля, оптимизированный исходя из условий оптимального

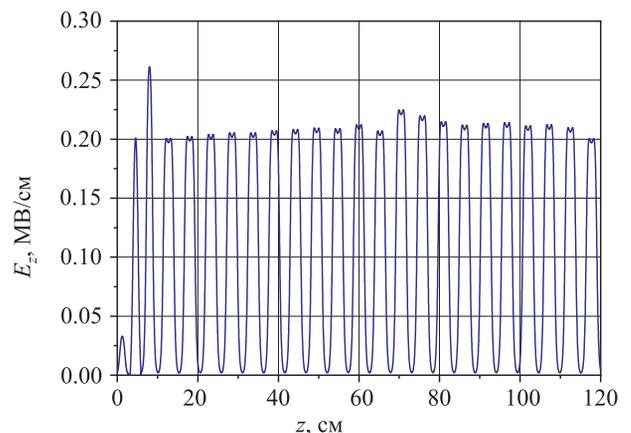


Рис. 1. Распределение ускоряющего поля на оси структуры

^а E-mail: v-k32@yandex.ru

^б E-mail: shvedunov@gmail.com

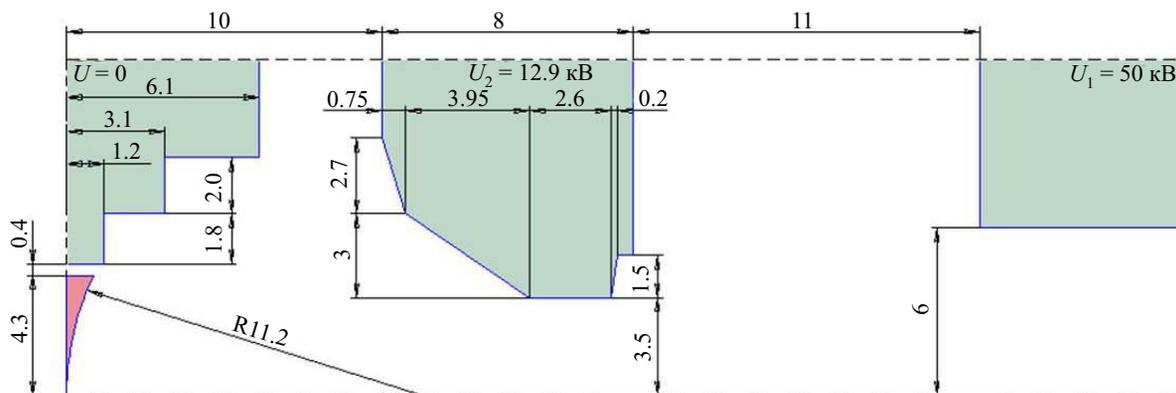


Рис. 2. Геометрия 3-электродной электронной пушки

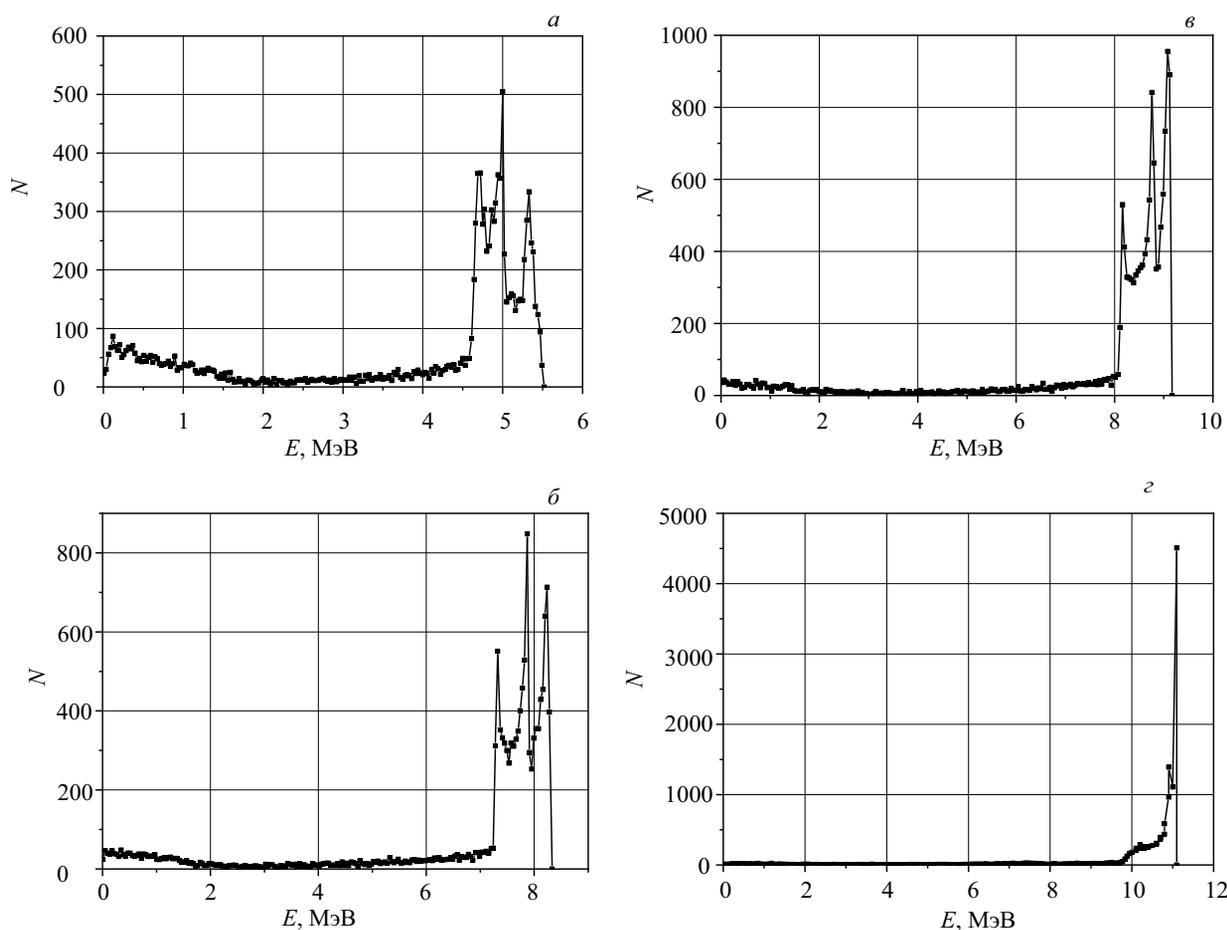


Рис. 3. Расчетные спектры ускоренного пучка для тока инжекции 850 мА и различных уровней потерь СВЧ-мощности в стенках ускоряющей структуры: а — 0.75 МВт; б — 1.04 МВт; в — 1.17 МВт; г — 1.62 МВт

группирования инжектированного от пушки непрерывного пучка, не приводящий к появлению обратного потока частиц. Вторая и третья ускоряющие ячейки готовят сгустки для дальнейшего ускорения в регулярной части структуры, именно они являются основным источником обратного потока.

Инжекция пучка в ускоряющую структуру осуществляется от 3-электродной электронной пушки, геометрия которой показана на рис. 2. На катод пушки подается постоянное напряжение -50 кВ, на управляющий электрод поступают импульсы высокого напряжения с регулируемой амплитудой и длительностью. В номинальном режиме амплитуда

импульса $+12.9$ кВ относительно катода обеспечивает ток пушки около 850 мА. Длительность импульса составляет 12 мкс. Обратный поток электронов поступает в пушку из пролетного отверстия диаметром 12 мм. Часть электронов при этом оседает на управляющем электроде, часть попадает на катод диаметром 8.6 мм.

Расчет динамики пучка, включая обратную бомбардировку катода, был выполнен с помощью программы Partmela [9] с электромагнитными полями ячеек из программы Superfish [10]. Спектры пучка на выходе ускоряющей структуры, рассчитанные для различных уровней мощности СВЧ-потерь в стенках,

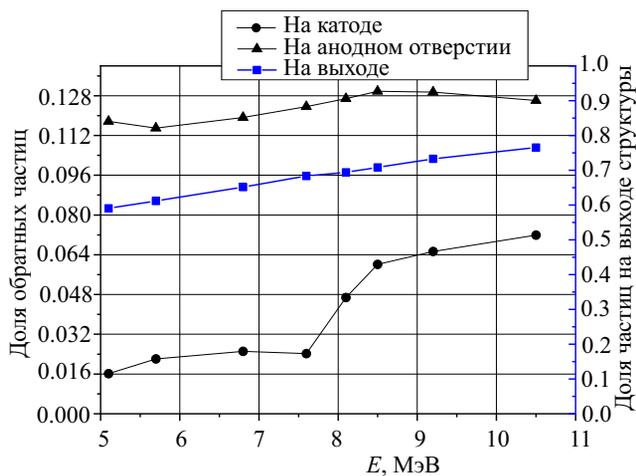


Рис. 4. Зависимость от энергии ускоренного пучка доли обратных частиц в плоскости анодного отверстия и на катоде, а также доли частиц на выходе ускоряющей структуры

представлены на рис. 3. На рис. 4 приведены зависимости от энергии ускоренного пучка доли обратных частиц в плоскости анодного отверстия и на катоде, а также доли частиц на выходе ускоряющей структуры. Как видно из рис. 4, доля электронов всех энергий на выходе ускоряющей структуры меняется от 60 до 78%, при изменении энергии ускоренного

пучка в диапазоне 5–10 МэВ, при этом доля обратных частиц колеблется в диапазоне $12.5 \pm 1\%$, остальные частицы оседают на стенках пролетного канала и резонаторов ускоряющей структуры.

Доля электронов, достигающих катода, меняется от примерно 2% в диапазоне энергий 5–7.5 МэВ до 6–7% выше 8.5 МэВ. Скачок в области 8 МэВ объясняется действием тормозящего потенциала электронной пушки и особенностями спектров обратных электронов в области анодного отверстия, показанных на рис. 5 для диапазона энергий ускоренного пучка 5–10 МэВ.

Спектры электронов содержат максимумы, соответствующие формированию обратного потока ускоряющим полем 2-й и 3-й ускоряющих ячеек. При энергии ускоренного пучка выше 8 МэВ энергия первого максимума превышает тормозящий потенциал электронной пушки, составляющий 50 кВ, вследствие чего происходит скачкообразное увеличение числа электронов, достигающих катода.

На рис. 6, а показана расчетная зависимость импульсной мощности, выделяемой на катоде обратными электронами, от энергии ускоренного пучка. При энергии 10 МэВ величина импульсной мощности близка к 7 кВт, что соответствует примерно 30 Вт средней мощности при скважности 240, соответствующей минимальной скважности ускорителя, на котором проводились экспериментальные исследования. Эта величина превышает мощность накала

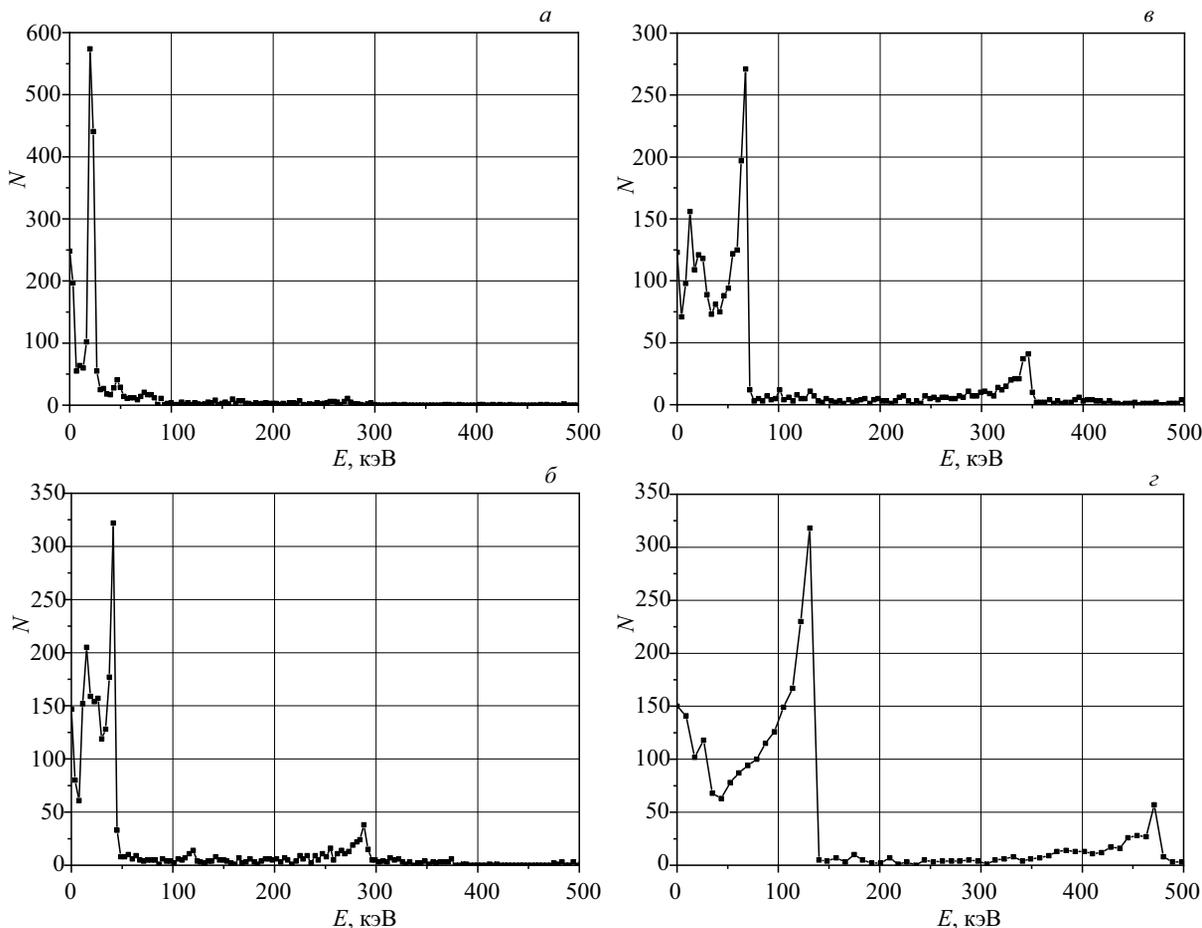


Рис. 5. Спектры обратных частиц для различных энергий ускоренного пучка в плоскости анодного отверстия, а – 5.1 МэВ, б – 7.6 МэВ, в – 8.5 МэВ, г – 10.5 МэВ

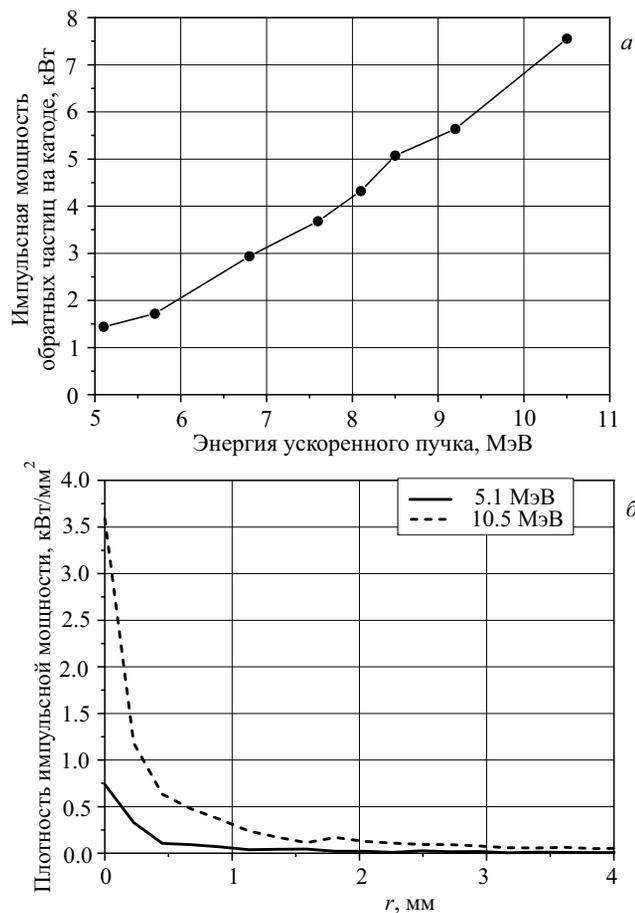


Рис. 6. (а) Зависимость импульсной мощности, выделяемой обратными электронами на катоде. (б) Радиальное распределение выделяемой мощности на катоде

катода, что, безусловно, сказывается на стабильности его работы и долговечности. Следует также отметить, что наибольшая плотность потока энергии, сообщаемой катоду, сконцентрирована в его центральной части, как это видно из рис. 6, б.

2. НАБЛЮДЕНИЕ ЭФФЕКТА ОБРАТНОЙ БОМБАРДИРОВКИ

Наблюдение эффекта обратной бомбардировки проводилось на действующем ускорителе. В процессе его эксплуатации основные параметры режима работы и параметры пучка записываются в базу данных с интервалом в 1 с. Для наблюдения эффекта использовались два параметра: средний ток источника питания катода электронной пушки и амплитуда импульса огибающей СВЧ-сигнала с антенны, установленной в ускоряющей структуре. Амплитуда импульса огибающей была откалибрована в единицах энергии пучка при проведении пусконаладочных работ.

В зависимости от характеристик обрабатываемой продукции ускоритель работает с различной энергией, меняющейся в диапазоне 5–10 МэВ, и с различной длительностью импульса ускоряющего поля, T_{RF} . Длительность импульса тока пушки при этом постоянна и составляет $T_{gun} = 12$ мкс. Импульс тока пушки начинается раньше и заканчивается позже импульса ускоряющего поля.

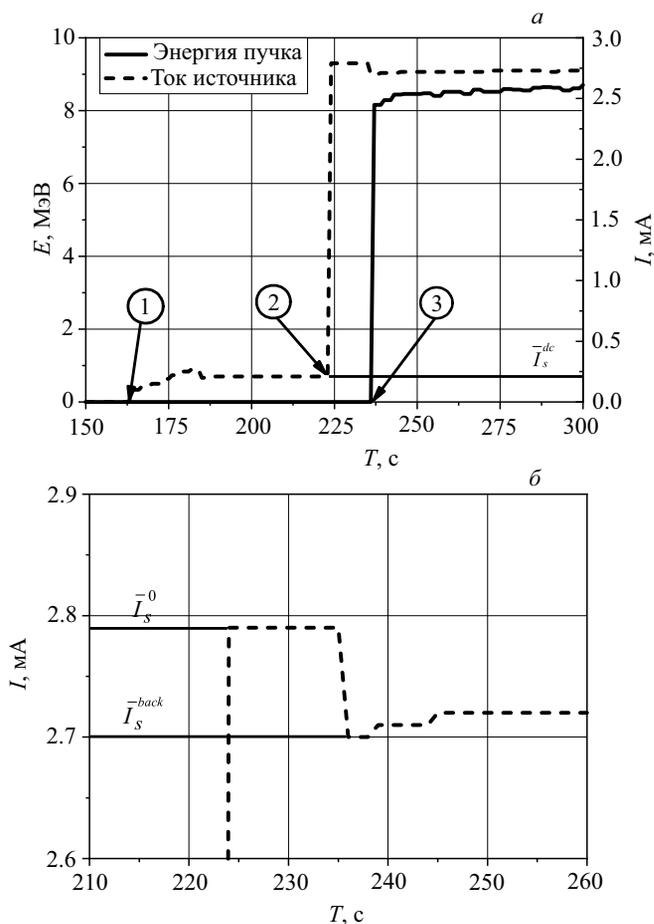


Рис. 7. Зависимость от времени среднего тока источника питания катода пушки и энергии ускоренного пучка; (б) — увеличенный масштаб

На рис. 7 в качестве примера показана зависимость от времени среднего тока источника питания катода пушки и энергии ускоренного пучка. Цифрами «1», «2» и «3» отмечены соответственно моменты времени подачи высокого напряжения на катод пушки, подачи импульсов на управляющий электрод и включения ускоряющего поля.

После подачи напряжения -50 кВ на катод в момент времени «1» при нулевом напряжении на управляющем электроде средний ток источника соответствует среднему току катода $\bar{I}_s^{dc} \approx 0.22$ мА, обусловленному провисанием на катод электрического поля через отверстие в управляющем электроде. После подачи импульсов на управляющий электрод в момент времени «2» устанавливается средний ток источника \bar{I}_s^0 . После включения ускоряющего поля в момент времени «3» за счет потока обратных электронов ток катода уменьшается до значения \bar{I}_s^{back} . Далее следует некоторое возрастание тока из-за дополнительного разогрева катода обратными электронами. Доля обратных электронов может быть оценена с помощью соотношения:

$$\frac{I_{back}}{I_{gun}} \approx \frac{\bar{I}_s^0 - \bar{I}_s^{back}}{\bar{I}_s^0 - \bar{I}_s^{dc}} \times \frac{T_{gun}}{T_{RF}}$$

На рис. 8 приведено сравнение измеренной (точки с ошибками) и расчетной доли частиц, вернувшихся на катод. Данные измерений и расчета неплохо

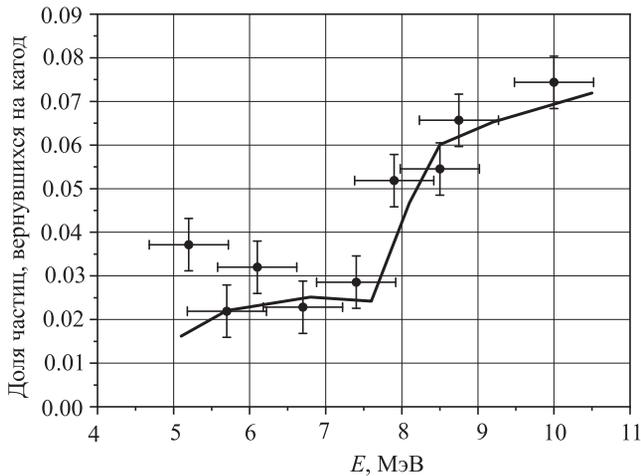


Рис. 8. Сравнение зависимости от энергии измеренной (точки с ошибками) и расчетной доли частиц, вернувшихся на катод

согласуются, при этом виден скачок доли возвращающихся на катод частиц в области 8 МэВ, обусловленный преодолением потенциала пушки, потоком, сформированным во второй ускоряющей ячейке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты изучения эффекта обратной бомбардировки катода электронной пушки технологического линейного ускорителя электронов со стоячей волной демонстрируют неплохое согласие между расчетными и экспериментальными данными. Для устранения влияния потока обратных электронов на работу электронной пушки необходима модификация системы инжекции ускорителя.

Calculation and Measurement of the Back-Bombardment Effect in a Standing Wave Technological Linear Electron Accelerator

V. V. Khankin^{1,2,a}, V. I. Shvedunov^{1,2,b}

¹Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

²«Laboratory of electron accelerators MSU Ltd». Moscow 119234, Russia.

E-mail: ^av-k32@yandex.ru, ^bshvedunov@gmail.com.

The back-bombardment effect is studied based on the example of the 10 MeV standing wave technological electron linac. The beam dynamics is calculated, the spectra of backstreaming electrons are obtained, and the power released by the backstreaming electrons at the cathode is estimated. The observed effects are in good agreement with the calculations.

Keywords: linear electron accelerator, beam dynamics.

PACS: 29.20.Ej.

Received 07 August 2019.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2020. **75**, No. 1. Pp. 52–57.

Сведения об авторах

1. Ханкин Вадим Валерьевич — мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-24-51, e-mail: v-k32@yandex.ru.

2. Шведун Вадим Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-24-51, e-mail: shvedunov@gmail.com.

Работа частично выполнена в рамках соглашения между Минобрнауки России и АО «НИИТФА» о предоставлении субсидии от 03.10.17 г. № 14.582.21.0011 «Создание и передача на клинические испытания образца импортозамещающего комплекса лучевой терапии на базе инновационного оборудования (6 МэВ ускорителя и конусно-лучевого томографа)». Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI58217X0011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tanabe E., Borland M., Green M. C. et al. // SLAC-PUB 5054, 1989.
2. Tanabe E. // Linear accelerator with improved input cavity structure and including tapered drift tubes. US Patent 5,381,072. 1995.
3. Lin Yuzheng, Tong Dechun, Yang Yue et al. // Tsinghua Science and Technology. March 1996. **1**, N 1. P. 70.
4. Ungrin J., Alexander S.B., Craig S.T. et al. // In Proceedings of the Linear Accelerator Conference 1990. P. 587.
5. Miller R.B., Loda G., Miller R.C. et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2003. **211**. P. 562.
6. Ermakov A.N., Khankin V.V., Alimov A.S. et al. // In Proceedings of RuPAC2016. P. 99.
7. Khankin V.V., Alimov A.S., Ermakov A.N. et al. // In Proceedings of LINAC2018. P. 136.
8. Shvedunov V.I., Alimov A.S., Ermakov A.N. et al. // Radiation Physics and Chemistry. 2019. **159**. P. 95.
9. PARMELA — code, originally developed by Crandall K.R.
10. Billen J.H., Young L.M. // «Poisson-Superfish». Los Alamos National Laboratory report LA-UR-96-1834 (Revised February 6. 2003).